

福井大学
工学部 研究報告
第24巻 第1号
昭和51年3月

磁化プラズマ中のトリベルピースモード II

——電子ビーム・プラズマ系における不安定性——

三 山 信 人^{*}・出 原 敏 孝^{*}・石 田 美 雄^{*}

Trivelpiece Mode in a Magnetized Plasma II —Instability in an Electron Beam-Plasma System—

Nobuto MIYAMA, Toshitaka IDEHARA, Yoshio ISHIDA

(Received Oct. 15, 1975)

Below the electron cyclotron frequency, spacially growing and damping waves are excited by a coaxial probe in a beam-plasma system. The former is a beam wave amplified by a reactive-medium instability, from the fact that its characteristics is very similar to those of a beam wave excited by mesh-modulation of a beam. While, the latter is considered to be a Trivelpiece mode of plasma, from the comparison of the experimental results with its dispersion relation derived theoretically.

1. 序 論

電子ビーム・プラズマ系において、これまでに多くの不安定性が報告されており、理論的には *Briggs*⁽¹⁾ らによって詳しく研究されている。ビーム・プラズマ系において起こりやすい不安定性は空間電荷波不安定性で、この場合成長するモードは、ビームの流れにそってビームの速度とほぼ等しい位相速度で伝播する。静磁場のかけられたビーム・プラズマ系において、不安定な電子波の存在する領域は、電子サイクロトロン周波数 ω_c を境として2つに分けることができる。電子サイクロトロン周波数より上の領域においてはベルンシュタイン波が存在しているが、この不安定性についてはすでに多くの報告⁽²⁾ がある。

今回、われわれは電子サイクロトロン周波数より下

の領域について報告する。この領域には、冷たいプラズマを考えた場合低密度ではトリベルピースモード⁽³⁾ が存在しており、ビーム・プラズマ系の不安定性を考える際に、このトリベルピースモードと電子ビーム中の空間電荷波とについて知っておくことが必要である。前者については前の報告 I⁽⁴⁾ にその分散関係及び伝播の様子が示されている。後者すなわちビームの波についてはこの報告の中で述べる。そして、電子ビーム・プラズマ系における結合された波の分散関係を述べ、さらに伝播の様子を見るために波面を描く。さらに、電子ビーム・プラズマ系においてプローブを使って波を励起した場合には、プラズマ波とビーム波とが同時に励起され、ビームの波はプラズマの誘電率が負の領域にあるときに起こるリアクティブ・メディウム不安定性⁽⁵⁾ により成長することを示す。

*応用物理学科

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した装置および伝播波測定のための干渉計は、前のトリベルビースモードの分散関係の報告【】に述べたものと同一であり、ここではその概要を述べる。装置の主体は内径 95mm のパイレックスガラス管で、放電領域、拡散領域、電子ビーム発生領域より成っている。放電により作られたプラズマと、電子銃で作られたビームとがそれぞれ反対側から測定領域に入り、電子ビーム・プラズマ系を形成する。プラズマとビームは独立に生成されており、独立にそのパラメータを変えることができる。また、電子銃はそのヒーター電流を変えることにより、パービアンズを変えることができる。ガスはアルゴンを使用しており、測定領域でのガス圧は $5 \sim 10 \times 10^{-4}$ Torr である。外部に設置されたコイルにより、測定領域にはほぼ一様な静磁場が管軸方向にかけられている。今回の実験では、180gauss と 120gauss、電子サイクロトロン周波数 $\omega_c/2\pi$ に換算して、504MHz と 336MHz に設定されている。波の励起、受信、プラズマパラメータの測定には 4 本の同軸プローブが使用され、管軸方向 (z 方向) と半径方向 (r 方向) とにそれぞれ 2 本ずつ入っている。また、電子銃の前に設置されているメッシュグリッドは、電子ビームに変調をかけ、電子ビーム中に波を励起するために用いられる。生成されたプラズマは、 z 方向には約 10% の密度変化の範囲内で一様であり、 r 方向の密度分布は【】の図 7 に示されている。電子温度は $6 \sim 10$ eV で、放電電流 $5 \sim 150$ mA に対し電子密度は $5 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ である。電子の衝突周波数は約 6MHz で、実験で使用する周波数 $150 \sim 500$ MHz に比べて無視できる。

電子ビームやビーム・プラズマ系における伝播波形の観測には、【】に述べた干渉計が使用され、観測された波形から波数や成長率が決定される。自然励起の周波数スペクトルはスペクトラム・アナライザーによって観測される。

3. 実験結果および考察

電子ビーム・プラズマ系における不安定性を調べる前に、電子ビームとプラズマとにおいてそれぞれ独立にその分散関係を調べておく必要がある。プラズマの場合は【】においてすでに述べたので、ここでは電子ビーム中の波について述べる。図 1 (a) に、電子ビーム加速電圧 $V_b = 250$ V の場合にプローブによって励起されたビーム波の伝播波形を示す。横軸は励起プロ

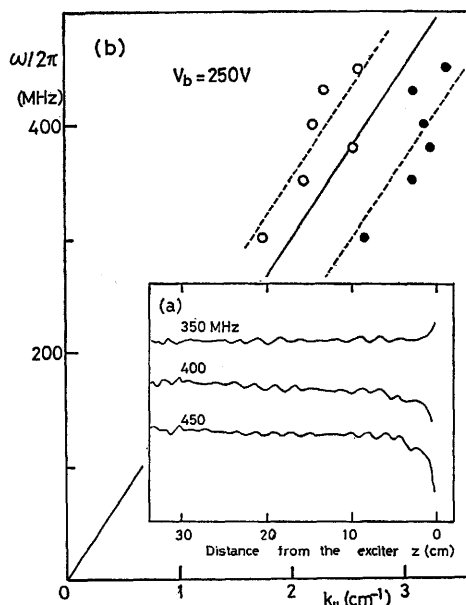


図 1 (a) ビーム波の伝播波形
(b) ビーム波の分散関係

ブから受信プローブまでの距離 z であり、ビームは図の右から左へ入射されている。この波形はビートをうっているので、波数 k が異なる 2 つの波が重ね合わさったものと考えて、それぞれの波数をプロットしたのが図 1 (b) である。実線は $\omega = v_0 k_{||}$ (v_0 はビームの速度) を満たす直線である。冷たい電子ビームの空間電荷波の分散式は

$$1 - \frac{\omega_{pb}^2}{(\omega - k_{||} v_0)^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

である。ただし、 ω は角周波数、 $k_{||}$ は磁場に平行な方向の波数成分、 ω_{pb} は電子ビームのプラズマ周波数 ($= \sqrt{n_b e^2 / m \epsilon_0}$, n_b はビームの密度、 ϵ_0 は真空中誘電率、 m , e はそれぞれ電子の質量、電荷) である。(1) 式を書き換えれば、

$$\omega = v_0 k_{||} \pm \omega_{pb} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。すなわち、 ω 軸上の $\pm \omega_{pb}$ を通り傾き v_0 の 2 本の直線となり、それぞれ速い空間電荷波、遅い空間電荷波と呼ばれている。図の 2 つのブランチの平均的な分散関係を点線で示してある。この 2 本の直線は ω 軸方向に $2\omega_{pb}$ だけ離れたっている。そこで図 1 (b) からビームのプラズマ周波数を求めると $\omega_{pb}/2\pi = 65$ MHz となる。一方、電子ビームの加速電圧、電流から計算されたビーム密度を使ってビームのプラズマ周波数を計算すると $\omega_{pb}/2\pi = 85$ MHz となり、

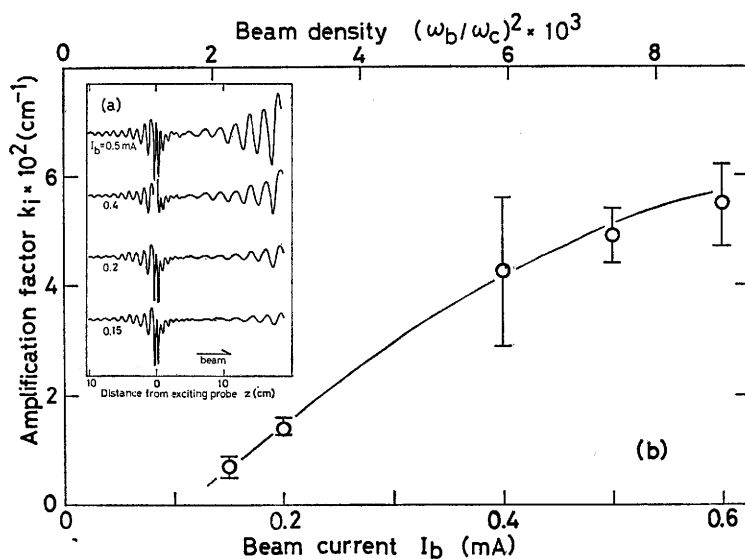


図2 (a) 電子ビーム電流をパラメーターにした z 方向成長波形
 (b) 成長率の電子ビーム電流に対する依存性
 $(\omega_p/\omega_c)^2 = 1$, $V_b = 200$ V, $\omega/2\pi = 360$ MHz

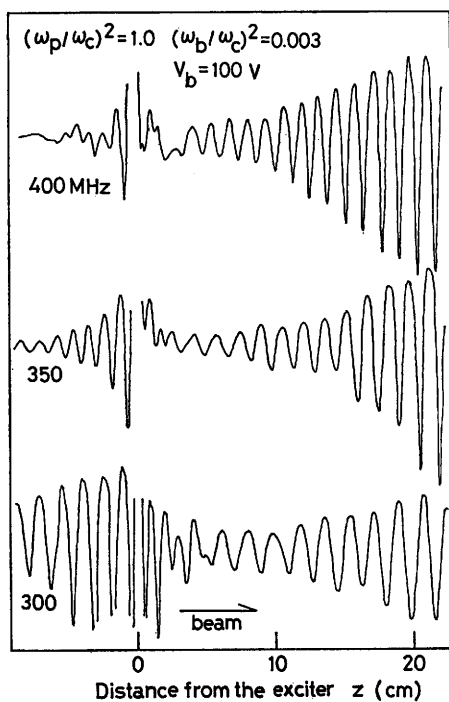
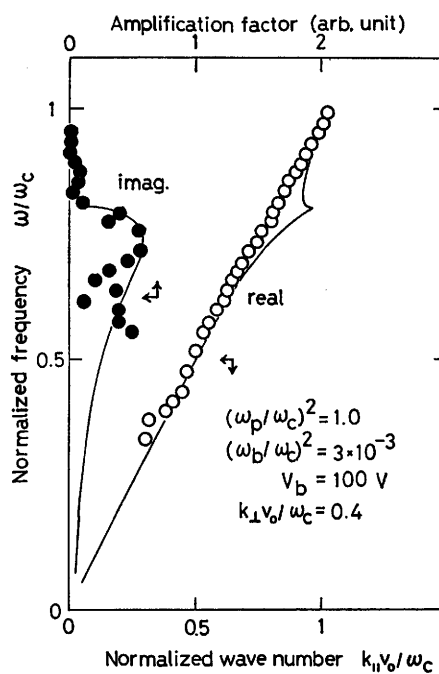


図3 (a) 周波数をパラメーターにした成長波の z 方向伝播波形



(b) 成長波の分散関係 (波数と成長率の周波数依存性)

図1(b)からの結果と大体一致している。従って、プローブにより、電子ビーム中に2つの空間電荷波を励起することができる。

電子ビーム・プラズマ系において、同様にして干渉計を用いて波を観測すると、ビームの向きに成長する波を見つけることができる。まず最初に、電子ビームの電流、すなわち電子ビームの密度のみを覚えて観測した波形を図2(a)に示す。横軸は励起プローブから受信プローブまでの距離 z を表わしている。得られた波形は、ビーム電流の増大とともに成長率も大きくなっている。図2(b)は、この振幅の変化から成長率 k_i を計算してプロットしたものである。この図から、ビーム密度とともに成長率が増大する不安定性であることがわかる。

次に、プラズマとビームのパラメーターを一定にした時、この成長波の周波数に対する変化を調べたのが図3である。図3(a)にえられた波形が示されている。図において、 $z=5\text{cm}$ ぐらいのところからビームの向きにそって成長波が観測されており、周波数の変化に対し、波数 $k_{\parallel r}$ (以後波数は k_{\parallel} とする) と成長率 $k_{\parallel i}$ が変化している様子がわかる。また、励起プローブのまわりの減衰波はトリプルベースモードであろうと考えられるが、これについては後で述べる。図3(b)に成長波の分散関係(波数 k_{\parallel} , 成長率 $k_{\parallel i}$ の周波数依存性)を示す。ここで横軸は $k_{\parallel} v_0/\omega_c$ で表わされる波数と、任意単位で書かれた成長率 $k_{\parallel i}$ で

ある。白丸が波数 $k_{\parallel} v_0/\omega_c$ を、黒丸が成長率 $k_{\parallel i}$ を表わしている。成長波の位相速度成分 ω/k_{\parallel} はビームの速度 v_0 とほぼ等しくなっており、電子ビームの空間電荷波不安定性であることがわかる。図3(b)の実線は、電子ビーム・プラズマ系における分散式すなわち、電子ビームとトリプルベースモードとを結合させた時の分散式⁽⁶⁾

$$k_{\perp}^2 = -k_{\parallel}^2 \frac{\mathbf{K}_{\parallel}}{\mathbf{K}_{\perp}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

から実験条件と $k_{\perp} v_0/\omega_c = 0.4$ を用いて計算された理論曲線である。ここで、 \mathbf{K}_{\parallel} , \mathbf{K}_{\perp} は

$$\mathbf{K}_{\parallel} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - \frac{\omega_p b^2}{(\omega - k_{\parallel} v_0)^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\mathbf{K}_{\perp} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_c^2} - \frac{\omega_p b^2}{(\omega - k_{\parallel} v_0)^2 - \omega_c^2}$$

(ω_p , ω_c はそれぞれプラズマ周波数, サイクロトロン周波数)

で表わされる電子ビーム・プラズマ系における誘電率テンソルの成分であり、 k_{\perp} は磁場に垂直な方向の波数成分である。波数(実部)の理論値と実験値はよくあっており、成長率(虚部)も傾向は同じであるので、この不安定性は電子ビームとトリプルベースモードの結合により生じたものであると言える。

図4には、図3のような分散関係において、最大成長率の起こる周波数 ω/ω_c をプラズマ密度 $(\omega_p/\omega_c)^2$ に対して描いたものである。実線は、 $k_{\perp} v_0/\omega_c = 0.4$ と 0.6 の場合に、分散式から計算されたプラズマ密

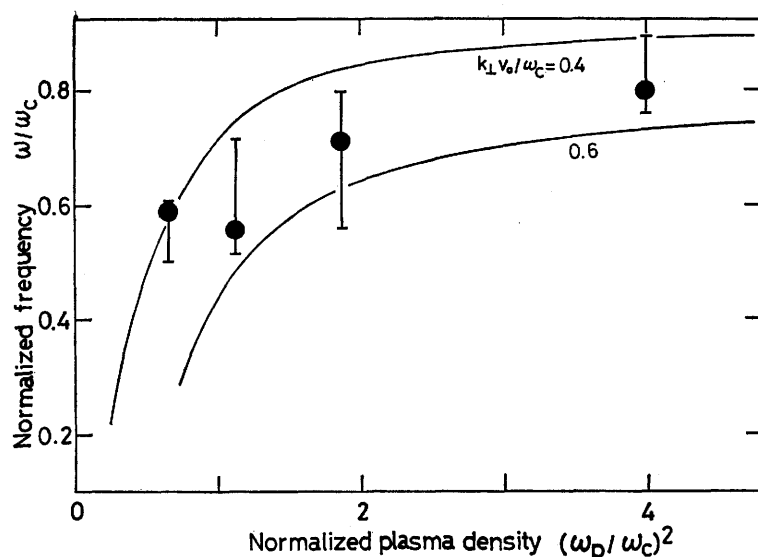


図4 最大成長の起こる周波数と密度の関係

度に対する最大成長率の起こる周波数、すなわち、ビームとトリベルピースモードとの交点の周波数を表わしている。ビームとトリベルピースモードの波数が等しいと置くと、

$$\frac{\omega}{v_0} = -k_{\perp} \sqrt{\frac{\omega_p^2(\omega^2 - \omega_c^2 - \omega_p^2)}{(\omega^2 - \omega_p^2)(\omega^2 - \omega_c^2)}} \quad \dots\dots(5)$$

となり、これを ω について解いた時のサイクロトロン周波数より下の領域の解が図4の実線である。この図において、実験値は $k_{\perp} v_0 / \omega_c = 0.4$ と 0.6 の間にあることから、この値が k_{\perp} の値を与えていると考えることができる。

以上 z 方向の波形を中心に議論して来たが、 k_{\perp} の測定など波の伝播の様子を詳しく調べるためには、 r 方向の干渉波形を調べる必要がある。図5 (a) (b) に、励起プローブ (z プローブ) からの距離 z をか

えて観測した r 方向の干渉波形を示す。横軸はプラズマ中心からの r 方向の距離 r 、斜めの軸は励起プローブからの距離 z であり、ビームは z の正の向きに流れている。図2 (a) や図3 (a) にある波形にも表われているが、 z 方向の波形では、励起プローブからはまず減衰する波があって、それから成長する波が続いており、それらの波長は一般に異っている。そこで z 方向の波形で、これら2つの波が異なる波長をもつ場合を (a) に、ほぼ等しい波長をもつ場合を (b) に示してある。いずれも電子ビームの加速電圧 $V_0 = 100V$ であるが、電子銃のパービアンスが異なるために、ビーム電流、すなわちビーム密度が異っている。この波形は、波のある時刻における空間的な広がりを示しているので、各波形の同位相の点を結ぶことによって波面を作ることができる。

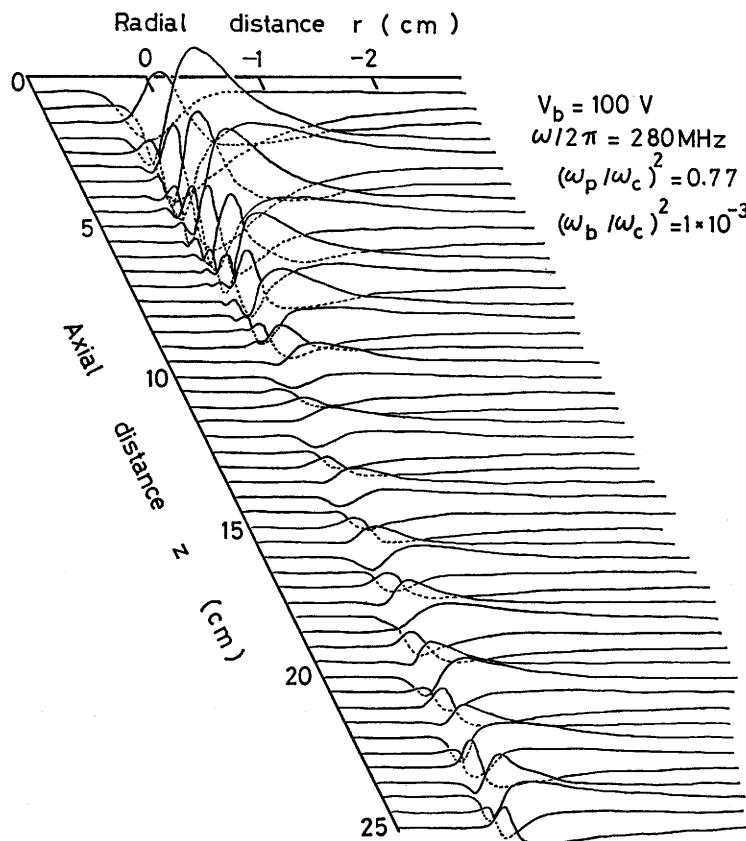


図5 (a) プローブで励起された波の伝播波形，励起プローブの位置は $z=r=0$

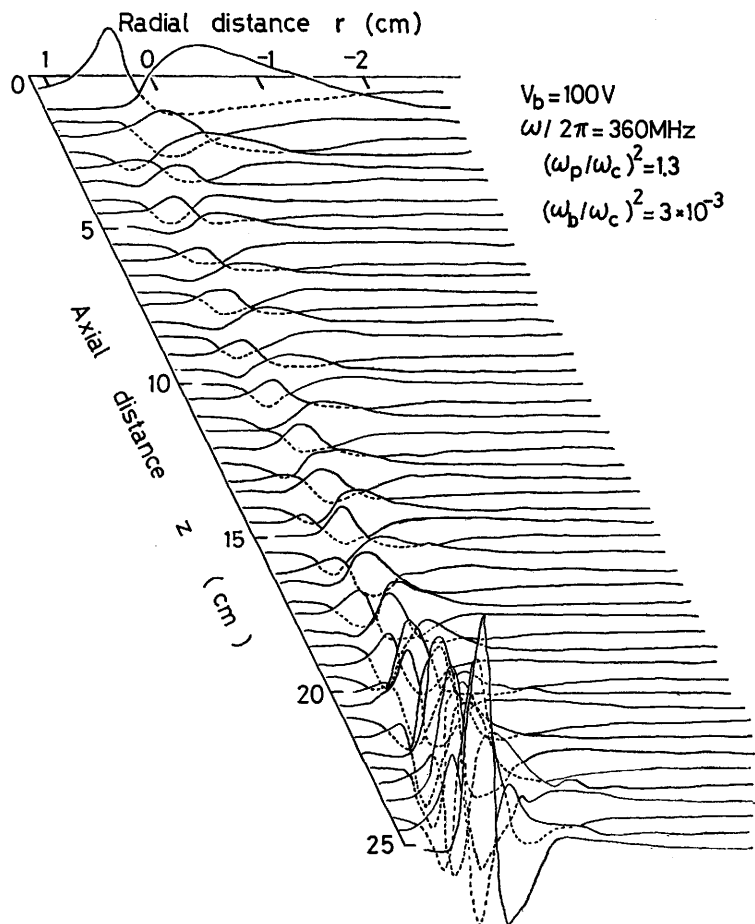


図5 (b) プローブで励起された波の伝播波形, 励起プローブの位置は $z=r=0$

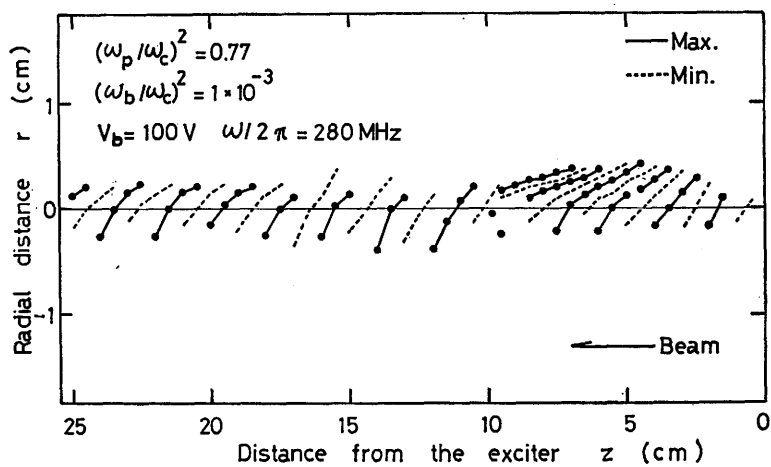


図6 (a) プローブ励起された波の波面

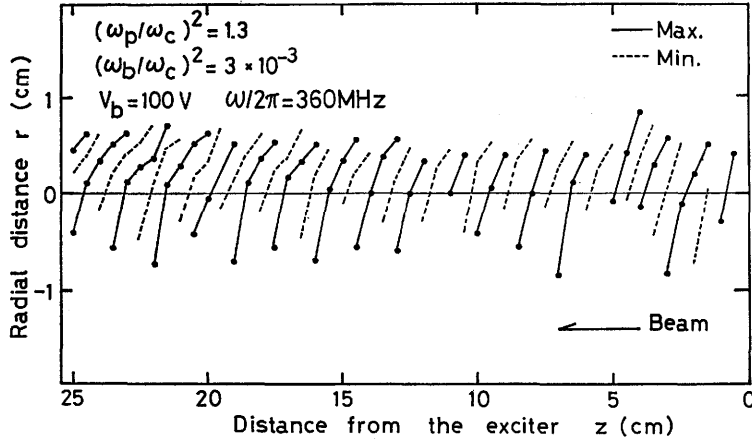


図6 (b) プロープ励起された波の波面

図6 (a),(b) は図5 (a),(b) の波形の山および谷を結んで作った波面である。図5 (a),(b) が図6 (a),(b) にそれぞれ対応している。図5と同様、縦軸はプラズマ中心からの半径方向の距離 r であり、横軸は励起プローブからの軸方向距離 z である。ここにおいて r プローブは、図の r が負の側から挿入されており、プラズマ中心 ($r=0$) を越えるとプローブのプラズマに与える影響のため十分な信頼をおくことはできない。(a) の場合は、 $z=0\sim 10\text{cm}$ までが減衰波に、 $z=10\sim 25\text{cm}$ が成長波に対応している。 $z=10\text{cm}$ に位相の切れ目があり、ここを境にして2つの波、すなわち、減衰波、成長波は異なる波数ベクトル k で伝播していることがわかる。従って、このようにプローブを使って電子ビーム・プラズマ系中に波を励起すると、2つの波が同時に励起されることが出来る。これらの2つの波の分散関係 ($k_{\parallel} - \omega$) から、減衰波がトリプルピースモードであり、成長波が電子ビームの空間電荷波であることが示される。それ故、電子ビーム・プラズマ系においてプローブを用いて波を励起すると、プラズマ波とビーム波とが同時に励起され、まず強く励起されたトリプルピースモードの減衰の様子が観測され、引き続いて、同時に励起されゆっくり成長して来たビーム波が観測されている。図6 (b) の場合、今述べたのとは様子が異なり、位相の切れ目もなく単一の波が伝播しているように見える。これは2つの波が同期した場合であると考えられるが、このことに関しては現在検討中である。

図6 (a) の成長波がビームの波であるか否かを調べるために、電子ビームに変調をかけてプラズマ中に

入射した場合の波形が図7 (a) である。横軸はビームのプラズマへの入口からの距離 z でかかれているので、ビームの向きは図の左から右である。図に示されているように単一の波が成長し、飽和している。この波形から波数 k_{\parallel} と成長率 $k_{\parallel i}$ を測定し、周波数に対して描いたのが図6 (b) である。図の縦軸、横軸は図3 (b) と同じである。実線はビームの直線 $\omega =$

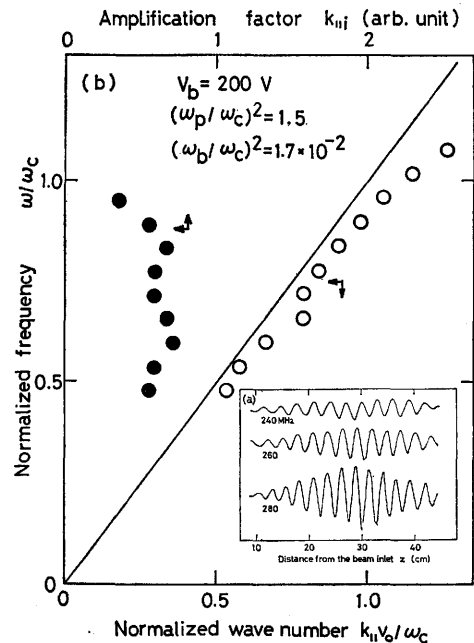


図7 (a) 変調電子ビームにより励起された成長波形 (b) 分散関係 (波数と成長率の周波数依存性)

$v_0 k_{\parallel}$ である。波数はビーム波の分散を表わしており、電子ビームの空間電荷波が励起され成長していることを示している。このことは、電子ビームに変調をかけることにより電子ビーム中に空間電荷波を励起し、その上でプラズマ中に入射しているので、ビームの波がプラズマの影響で成長していることを表わしている。また成長率も図3(b)と同じ傾向を示しており、プローブで励起される場合の成長波は、電子ビームの空間電荷波がプラズマ波との交点より下の領域、すなわち、プラズマの誘電率が負の領域を通る時に起こるリアクティブ・メディウム不安定性によって成長していると結論できる。

以上、外部から波を励起して、電子ビーム・プラズマ系において、電子サイクロトロン周波数より下の領域の様子を調べたのであるが、電子ビームを強く、すなわち電子ビームの密度を大きくすると、外部からの励起なしでも波を観測することができる。これを、自然励起と呼ぶことにする。図8に放電電流をパラメータにした、自然励起の周波数スペクトルが示されている。放電電流が大きくなるにつれて、スペクトルは周波数の高い側へ移動している。自然励起は、最大成

長率の近くの周波数で起こると考えれば、図8の結果を次のように説明することができる。前の結果から成長率の大きいところは、プラズマ波とビーム波との交点付近である。密度が大きくなるとプラズマ波は周波数の高い側へ移動するので、電子ビームの速度が一定であれば、交点も周波数の高い側へ移動する。従って、自然励起も密度の増大とともに周波数の高い側へ移動するのである。

4. 結 論

電子ビーム・プラズマ系において、プローブを用いて波を励起した結果、電子ビームとトリベルピースモードとの結合による不安定性が観測された。また、この不安定性は、電子ビームの波がトリベルピースモードの存在によりプラズマの誘電率が負になっている領域を通ることによって成長するリアクティブ・メディウム不安定性である。

プローブを使ってこの系に波を励起すると、同時に2つの波、すなわち、ビーム波とプラズマ波とが励起され、アンテナから遠ざかるにつれて、まず減衰してゆくトリベルピースモードがあらわれ、次に成長してきたビーム波があらわれてくるのである。

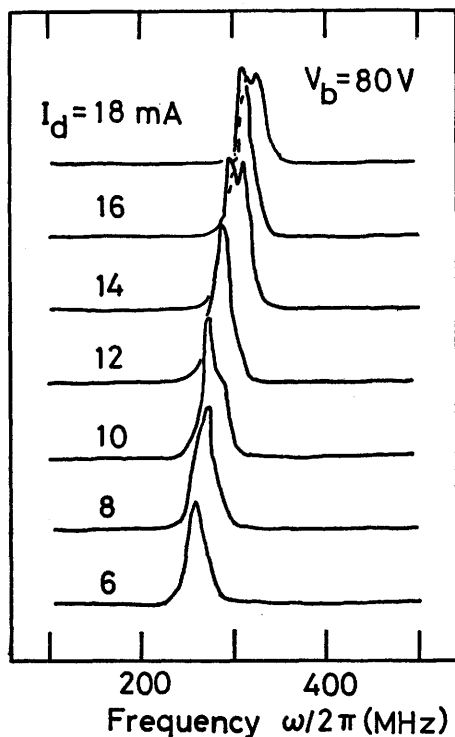


図8 放電電流の変化に対する自然励起の周波数スペクトラム

参考文献

- 1) R. J. Briggs, *Electron-stream interaction with plasmas* (The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964).
- 2) 例えば, M. Seidl et al; Comparison of convective and absolute instabilities in a beam-plasma experiment (Research Report SIT-P275 Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey).
T. Idehara, M. Takeda and Y. Ishida; J. Phys. Soc. Japan, 38 (1975) 1125.; 39 (1975) 213.
- 3) A. W. Trivelpiece and R. W. Gould; J. Appl. Phys., 30 (1959) 1784.
- 4) 三山信人, 出原敏孝, 石田美雄; (福井大工報投稿中).
- 5) (1)のp54.
- 6) (1)のp85.